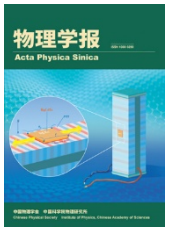


物理学报
Acta Physica Sinica
ISSN 1000-3290,CN 11-1958/O4

《物理学报》网络首发论文

题目：透明可开关的超宽带频率选择表面电磁屏蔽研究
作者：王成蓉，唐莉，周艳萍，赵翔，刘长军，闫丽萍
网络首发日期：2024-05-10
引用格式：王成蓉，唐莉，周艳萍，赵翔，刘长军，闫丽萍．透明可开关的超宽带频率选择表面电磁屏蔽研究[J/OL]．物理学报.
https://link.cnki.net/urlid/11.1958.o4.20240509.2128.002

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

网络首发时间：2024-05-10 17:39:27
网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.1958.o4.20240509.2128.002

透明可开关的超宽带频率选择表面电磁屏蔽研究*

王成蓉[1)2)] 唐莉[1)] 周艳萍[1†)] 赵翔[1)] 刘长军[1)] 闫丽萍[1†)]

1)（四川大学电子信息学院，成都，610065）

2)（成都锦城学院电子信息学院，成都，611731）

摘 要

高频电磁波主要通过玻璃门窗进入建筑物内部，设计具有光学透明且屏蔽功能可开关的超宽带电磁屏蔽体，对同时需要电磁安全和采光的特定场所具有重要工程应用价值。本文利用液态金属的流动性，提出了一种透明可开关电磁屏蔽体的设计新思路。利用液态金属流动性作为电磁屏蔽的切换开关，利用其导电性及Ω形频率选择表面（FSS）结构设计实现超宽带电磁屏蔽。该FSS结构由三层透明材料构成，中间层为聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA），顶层和底层为聚二甲基硅氧烷（PDMS），且其中嵌有正交排列的Ω型微通道。通过对微通道中注入液态金属，可将该FSS结构的频率响应从全通状态切换到带阻状态。双层Ω型微通道设计可增强液态金属的流动性并减半其用量，同时实现18.1 GHz以下（覆盖P、L、S、C、X和Ku波段）超宽带电磁干扰抑制，且具有高达80°的极化角度稳定性。所设计的FSS电磁屏蔽结构单元81%的面积未覆盖金属，可获得良好的光学透明性。通过仿真计算TE和TM两种极化方式下的反射系数和吸收率，深入分析了所设计结构的超宽阻带和高角度稳定性机理。对所设计结构进行制备和实验测试，测试结果与仿真结果基本吻合，验证了所设计FSS结构的超宽带电磁屏蔽性能。

关键词：电磁屏蔽，频率选择表面，液态金属，光学透明，可开关

PACS：42.25.Bs，42.25.Ja，78.20.Ci

基金：国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(批准号：U22A2015)
四川省科技厅国际合作项目(24GJHZ0386)资助课题
四川大学宜宾校市合作项目(2020CDYB-31)

† 共同通讯作者.E-mail:
闫丽萍 liping_yan@scu.edu.cn
周艳萍 ypzhou11@scu.edu.cn
第一作者. E-mail: chengrong_wang@126.com

1. 引 言

频率选择表面（FSS）是由亚波长结构单元周期性排列而成的二维结构，对入射到其上的电磁波呈现出独特的空间滤波特性[1]，在吸波材料[2,3]、天线罩[4,5]、电磁干扰（EMI）抑制[6,7]等多个领域内具有广泛应用。与金属网屏蔽相比，FSS

电磁屏蔽结构更轻便且具有频率选择性，可应用于特定场所以满足其电磁安全或健康需求，如重症监护室（ICU）、数据中心、安全装置、军事设施和关键基础设施等[8-14]。由于外部高频电磁波穿透混凝土墙壁时衰减严重，主要通过玻璃门窗进入建筑物内部，因此在提供电磁屏蔽的同时，需要考虑光学透明性和美观。随着无线技术和雷达技术的不断发展，对超宽带电磁屏蔽结构的需求日益增加。因此，设计一种透明的超宽带电磁屏蔽体具有重要应用价值。

近年来，已有许多研究致力于电磁干扰（EMI）抑制的光学透明频率选择表面（FSS）结构设计[15-20]。一种常用策略是应用透明导电材料，例如通过银纳米线（Ag NW）或氧化铟锡（ITO）来实现透明屏蔽。Yang 等人使用银纳米线透明油墨设计了具有 81.6%透明度的 FSS 结构，在 0.71～1.25 GHz 和 1.73～2.16 GHz 的测量范围内产生良好反射，实现了 GSM 频段 EMI 的有效屏蔽[15]。Zhang 等人利用 ITO 制作 FSS 吸收体，通过吸收电磁波实现从 7.8 GHz 到 18.0 GHz 的透明宽带屏蔽[18]。另一种方式则是将 FSS 结构设计中常用的介质基板更换为透明基板，通过设计图案未覆盖区域实现光学透明。例如，Dewani 等人利用丝网印刷技术将基于电阻性油墨的 FSS 结构印刷在玻璃上，在 1.5 至 2.5 GHz 频段实现理想的屏蔽[20]。因此，当前光学透明 FSS 设计可以有效抑制特定频段或双频甚至三频段的 EMI，但尚缺乏能够抑制超宽带范围（包含 P、L、S、C、X 以及 Ku 波段）EMI 的电磁屏蔽设计。

随着无线新技术的不断发展，对多功能电磁屏蔽结构提出了新要求，超宽带电磁屏蔽、电磁性能动态可调等成为电磁屏蔽设计的重要功能特点。对于宽带电磁屏蔽的研究，目前主要基于小型化、多层技术实现宽带电磁特性[21-24]。 Habib S 等人通过多层及卷曲 FSS 方形和圆形环路元件实现了 S、C、X 频段的宽带带阻[21]，Xu, S J 等人则通过三层级联 FSS 结构实现了小型化及 7.34 GHz～15.0 GHz 的宽阻带抑制[22]。电磁性能动态可调通常分为可开关和可调谐两种[25-32]，可开关

一般是将 PIN 二极管作为开关，利用其导通/截止的两种状态实现 FSS 对电磁波的不同调控功能，如允许电磁波通过转换为反射或吸收电磁波。可调谐则是利用可变电容二极管、机械马达、铁氧体等实现性能可调谐，例如工作频带移动（以动态扩展 FSS 工作带宽）、电磁波吸收幅度的变化等。然而，机械调谐结构笨重且不易与 FSS 结构集成，利用铁氧体构建的可调 FSS 结构需外加偏置磁场，基于有源器件的电子调谐方法需额外的偏置电路，这些都对 FSS 结构设计提出了高要求，且导致 FSS 单元结构中不透明区域面积增加。一种替代方法是使用液态金属或液态金属合金注入多层介质腔的微通道中，形成槽型带通 FSS 结构，通过切换液态金属的注入层，实现工作频段在 C 和 Ku 波段间的调谐[25]；也可以利用液态金属注入与否实现开关功能，切换 FSS 结构的滤波功能，例如 Ghosh S 等人将 EGaIn 注入 FSS 结构微通道，实现全通到带通（TE 极化）/带阻（TE、TM 极化）的切换[32]。这些设计利用液态金属实现了可调谐或可开关，且使用透明 PDMS 封装，但因其结构密集导致未覆盖金属区域过少，光学透明性能欠佳。综上所述，尽管分别满足透明、可调或宽阻带 FSS 结构的研究较多，但尚未见具有可开关功能的透明超宽阻带 FSS 结构的报道。

为此，本文利用液态金属的流动性，提出了透明可开关超宽带电磁屏蔽体的设计新思路。借助于液态金属（EGaIn，按重量计 75%镓，25%铟）的流动性实现电磁屏蔽功能的开关，利用其导电性和双层正交 Ω 形 FSS 结构设计实现超宽带且高角度稳定的电磁屏蔽性能。这种 FSS 结构性能切换设计方法避免了传统可开关/可调谐 FSS 结构中常见的 PIN 二极管、可变电容二极管等非透明元件的使用，减小了 FSS 单元结构中不透明区域面积，获得了良好的光学透明性，为透明可开关的超宽阻带 FSS 结构实现多功能电磁屏蔽提供了有益参考。

2. 可开关光学透明超宽阻带 FSS 设计

如前文所述，能够同时满足宽带、透明和可开关的FSS电磁屏蔽体设计具有

很大挑战性。文本采用透明介质和液态金属，设计了一种新型光学透明可开关的超宽阻带FSS结构。该结构包含三层透明介质材料，如图1(a)所示，中间层PMMA主要起支撑和阻抗匹配的作用，顶层和底层分别为PDMS层，内嵌有供液态金属流动的Ω型微通道（图1(b)）。为了保证FSS结构的极化稳定性，两层PDMS中的微通道结构正交分布在PMMA层两侧。液态金属选用低粘度、无毒性的铟镓共晶（EGaIn 按重量计75%镓，25%铟）。通过在微通道中注入液态金属，该结构可以从全通特性切换到阻带特性。FSS单元结构中所有材料的电磁特性参数如表1所示，可知PMMA和PDMS的损耗角正切δ 分别为 0.002和0.065。

表 1 FSS 单元结构所含材料的电磁特性参数

Table 1. Electromagnetic characteristics of the materials contained in the FSS unit

电磁特性参数	材料名	值
相对介电常数	PDMS	3 - j0.195
	PMMA	2.55 - j0.0051
	EGaIn	1
相对磁导率	PDMS	1
	PMMA	1
	EGaIn	1
电导率(S/m)	EGaIn	3.4×10^6

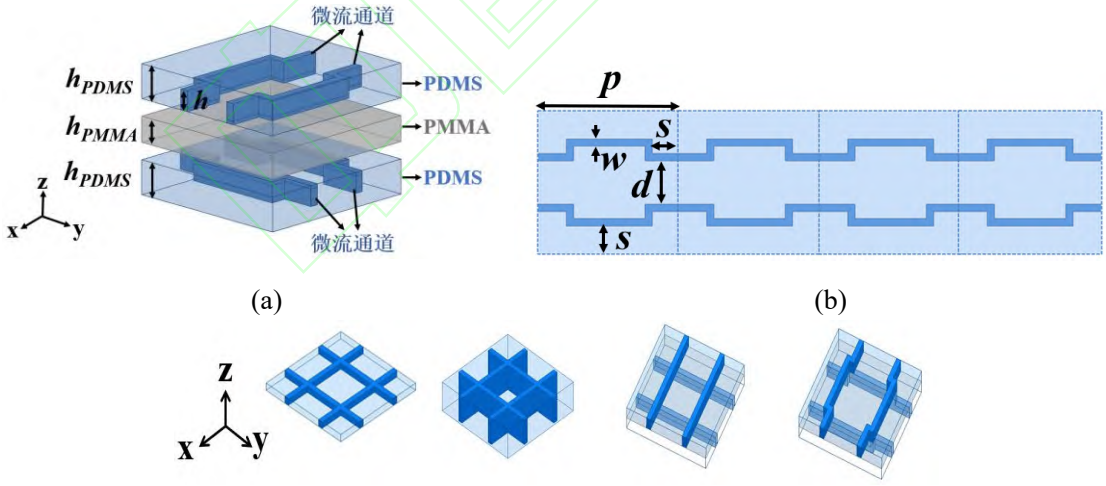


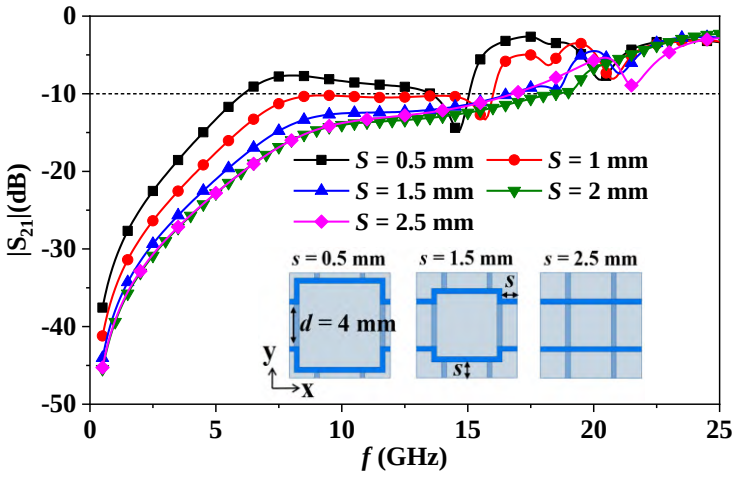
图 1 所设计 FSS 的结构图：(a)单元透视图；(b)单层 PDMS 内的液态金属流动示意图； (c) FSS 单元结构的演变过程

Fig. 1. Geometry of the proposed FSS structure: (a) Perspective view of the unit cell; (b) Schematic of liquid metal flow in a single layer of PDMS; (c) Evolution of the proposed FSS structure.

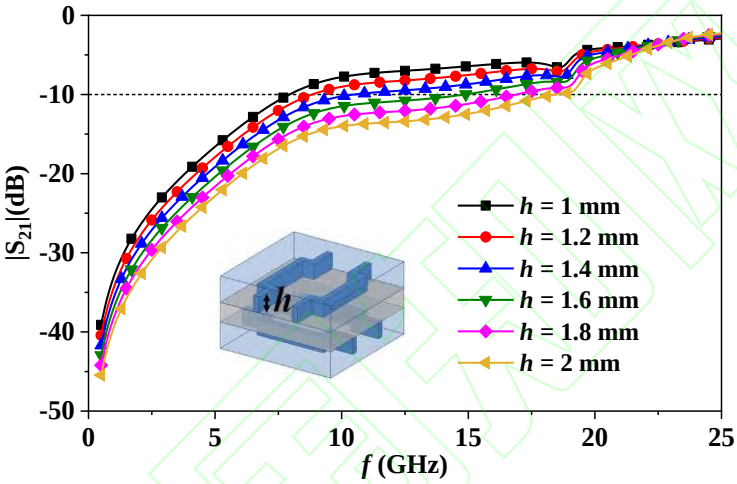
FSS 单元结构的设计过程如图 1（c）所示，设计雏形选用具有高通滤波特性

的网格结构。在单层 PDMS 内制作网格微通道，注入液态金属可实现高通滤波性能。考虑到加工工艺和液态金属合金的粘度，在 PDMS 层中制作的网格微通道的最小宽度为 0.5 mm，厚度为 0.6 mm[32]。通过增加微通道中液态金属的厚度，减小了 FSS 结构的等效电感，增加了等效电阻，从而改善了结构的输入阻抗，实现了超宽阻带。然而很难将液态金属流畅地注入网格形状的微通道中，因此将单层网格结构拆分成双层结构，双层结构中的每层 PDMS 内的微通道为平行结构，上下两层正交摆放，使得整体的微通道仍然呈现网格状，不影响其高通滤波特性。这样调整后，使得液态金属能更好的流动，与同样厚度的单层网格微通道相比，其微通道体积减半，即可减少一半的液态金属。因为 PDMS 固有的弹性和柔韧性，需要将 PDMS 层粘贴在具有支撑性的透明基底上，本文选择了高透明、坚固且易于获得的 PMMA，最后形成了 PDMS+PMMA+PDMS 的三层汉堡包结构（图 1（a））。

为了进一步提高 FSS 结构的阻带带宽和屏蔽性能，将每层平行微通道进行弯折，调整其等效电容和电感，最后形成 Ω 型微通道（图 1(c)）。平行通道演变为 Ω 型微通道的性能对比如图 2（a）所示。从图中可以看到，Ω 型微通道弯折部分到边缘的距离为 *s*（图 1(b)），更改 *s* 的值会导致单元图案的变化，改善单元的等效电感和电容。为了确保最大的光学透明度并实现极化稳定性，两层 PDMS 内的微通道结构呈正交排列，其弯折区域应尽量重叠。图 2（a）展示了变量 *s* 对传输系数$|S_{21}|$的影响，当 *s* 为 2mm 时，可以获得$|S_{21}| \leq$ -10 dB 的带宽高达 18.1 GHz。图 2（b）给出了微通道及液态金属厚度 *h* 对传输系数$|S_{21}|$的影响，可以看到，随着液态金属厚度的增加，FSS 结构的等效电感随之减小，等效电阻增加，从而改善了结构的输入阻抗，实现了超宽阻带。其他关键参数如 FSS 单元结构中微流通道间距（图 1(b)中的参数 *d*）对传输系数的影响见文献[33]，经过扫参优化的 FSS 结构参数取值见表 2 所示。



（a）



（b）

图2 FSS的传输系数随参数变化的影响：(a) 距离*s*的变化；(b) 液态金属厚度*h*的变化

Fig. 2. The transmission coefficient of the proposed FSS in terms of (a) distance *s* and (b) the liquid metal thickness *h*.

表 2 FSS 单元结构参数

Table 2. Value of parameters in the unit cell

参量	*d*	*s*	*w*	*h*	h_{PDMS}	h_{PMMA}	*p*
值 /mm	4	2	0.5	2	2.7	1.5	10

图 3 给出了所提出的频率选择表面（FSS）结构在不同情景下的传输特性。可以看到，当微通道中不存在液态金属时，该 FSS 结构在 18.1 GHz 以下的频率范围内的插入损耗小于 1.7 dB，表现出通带特性，与仅有聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）基板的传输特性相当，此时 18.1GHz 以下的入射波都可以顺利的通过。当微通道中被注入了液态金属时，该 FSS 结构表现出高通特性，即在 18.1GHz 以

下可以达到传输系数小于-10 dB，该频段范围内具有很好的屏蔽性能。

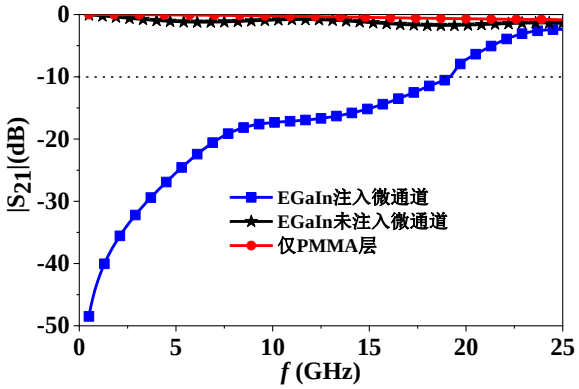
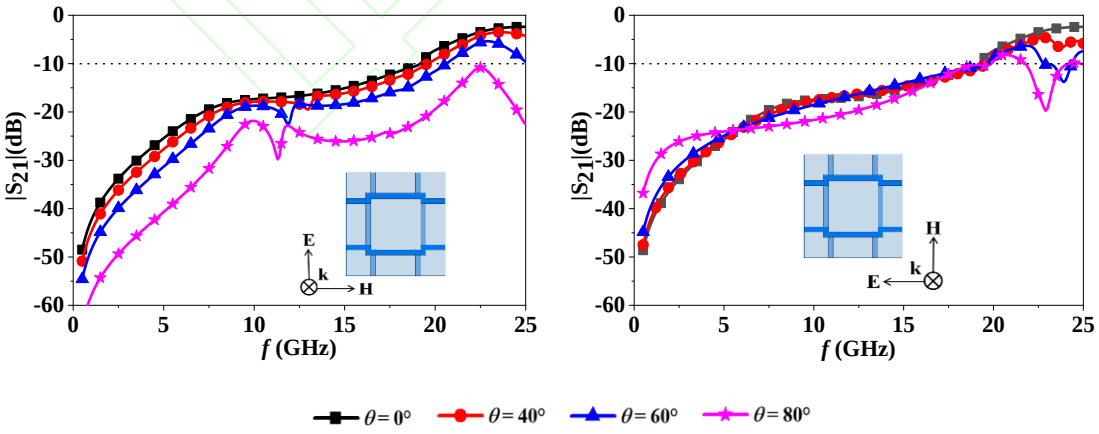


图3 不同场景下的传输系数

Fig. 3. The transmission coefficient for different scenarios.

由于电磁波入射到 FSS 结构的方向未知，研究所设计结构在不同入射角度下屏蔽性能的稳定性具有重要意义。图 4 给出了 TE 和 TM 两种极化方式下，所提结构传输特性随入射角度的变化。可以看出，对于 TE 极化，随着入射角从 0° 增加到 80°，$|S_{21}|$≤-10 dB 带宽从 18.1 GHz 扩展到 22.2 GHz，其屏蔽性能随着入射角度增加有所提升，尤其在入射角度达到 80° 时提升明显。而对于 TM 极化波，$|S_{21}|$≤-10 dB 带宽随入射角度增加几乎不变，始终维持在 18.1 GHz。由此可见，所设计结构在 18.1GHz 以下的超宽带范围内获得了高达 80° 的角度稳定性，且具有极化稳定性。



（a） （b）

图4 TE和TM极化条件下传输系数随入射角的变化：(a) TE极化，(b) TM 极化

Fig. 4. Simulated $|S_{21}|$ with respect to incident angles for (a) TE and (b) TM polarizations.

3. 机理分析

3.1. 等效电路分析

图 5 给出了该 FSS 结构的等效电路模型（ECM）以进一步分析其电磁屏蔽性能。等效电感（L）是由沿着液态金属与入射电磁波电场平行产生的电流引起的，相邻微通道之间的间隙产生等效电容（C），而等效电阻（R）则源于液态金属中的欧姆损耗以及介质基板的介质损耗。PMMA 层可以等效为一个 $L_{TL}C_{TL}$ 网络传输线模型。图 5（a）分析了从单层网格结构到 Ω 型结构的等效参数，注意为了图示更清晰，皆省略了等效电阻。图 5（b）展示了所提出 FSS 结构的等效电路：在 TE 极化条件下，FSS 的顶层由一个串联 RLC 谐振电路表示，底层则可以用一个并联 RLC 谐振电路表示。

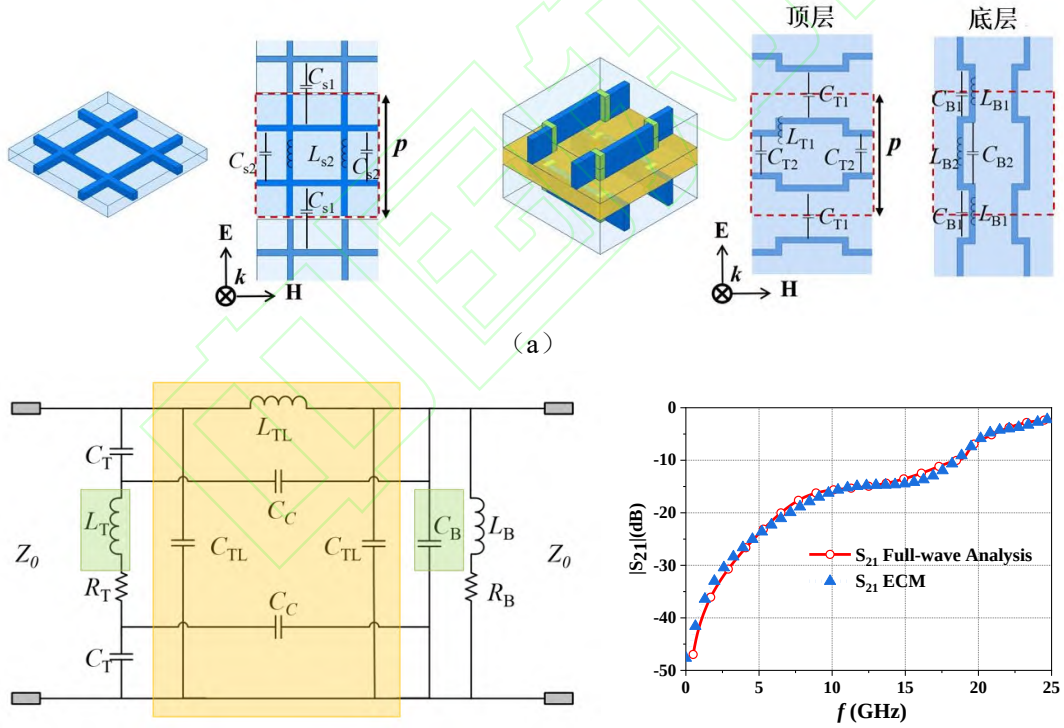


图5 (a)单层网格结构与文中FSS结构的等效电路模型(ECM)分析；(b)文中FSS的ECM；(c) ECM与全波分析传输系数比较

Fig. 5. (a) Equivalent circuit model (ECM) analysis of the single layer grid structure and the proposed three-layer FSS structure; (b) Summarized ECM of the proposed FSS; (c) Comparison of transmission coefficient between ECM and Full-wave Analysis.

等效电感和电容值使用文献[34,35]进行近似计算

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_{eff} \frac{2p}{\pi} log(\frac{1}{sin\frac{\pi s}{2p}}) \quad (1)$$

$$L = \mu_0 \mu_{eff} \frac{p}{2\pi} log(\frac{1}{sin\frac{\pi w}{2p}}) \quad (2)$$

式中 l 为条带长度，ε_0 和 μ_0 分别表示自由空间的介电常数和磁导率，ε_{eff} 和 μ_{eff} 分别表示基底的有效介电常数和有效磁导率。它们可以近似表示为 $\varepsilon_{eff} = (\varepsilon_r + 1)/2$ 和 $\mu_{eff} = \mu_r = 1$，其中 ε_r 和 μ_r 分别是基底的相对介电常数和相对磁导率，p 为单元周期，w 为金属贴片的宽度，s 为缝隙间的宽度。

中间层 PMMA 可等效为传输线，利用串联电感 L_{TL} 与并联电容 C_{TL} 进行描述[34]。通过优化，ECM 中的各集总元件值确定如下：L_T=2.53 nH，C_T = 0.03 pF，R_T = 10 Ohm，L_B = 0.34 nH，C_B = 103.68 fF，L_{TL} = 4.1 nH，C_{TL} = 20 fF, C_C = 25 fF。使用 ECM 获得的传输系数与全波分析的结果相吻合，如图 5（c）所示，验证了等效电路分析的正确性。

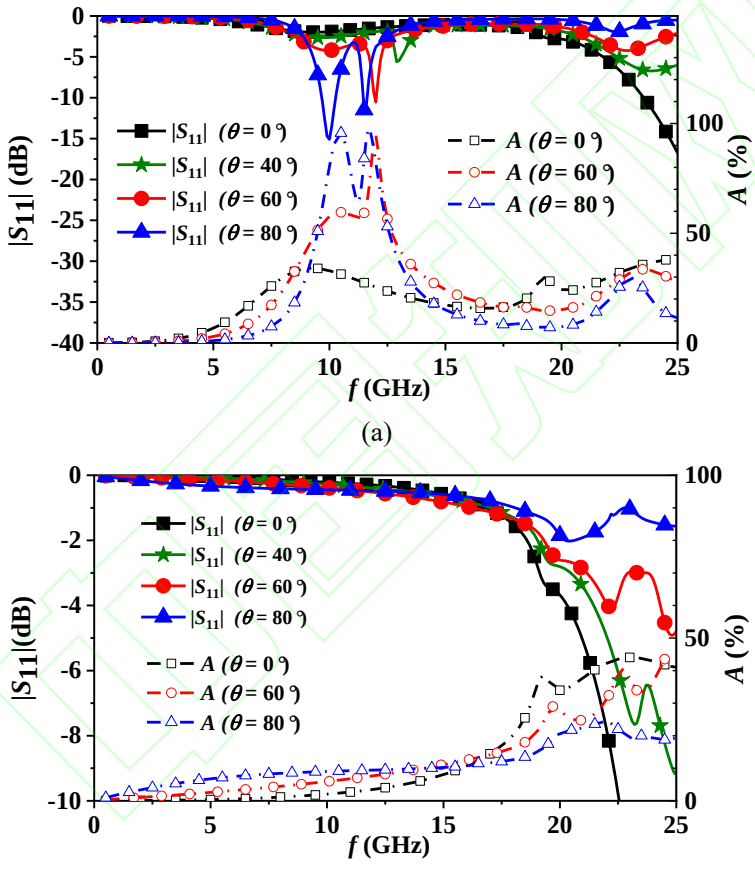
3.2. 超宽阻带及高角度稳定性分析

为了深入分析本文所提 FSS 结构的超宽阻带和高角度稳定性机理，这里给出了 TE 和 TM 两种极化下不同入射角度的反射系数与电磁波吸收率，如图 6 所示。从图 6（a）中可以看到，在 TE 极化垂直入射时，当频率低于 5 GHz 时，反射系数$|S_{11}|$保持接近 0 dB，此时入射波几乎全反射。随着频率的升高，直到 18.1 GHz，$|S_{11}|$都保持在-2 dB 以上。然而，在 6.9 至 18.9 GHz 的频率范围内可以观察到有超过 15%的吸收率，这主要是由于 PDMS 的介电损耗带来的。因为随着入射角（θ）的增加，TE 极化波的波阻抗根据 $Z_0/\cos\theta$ 逐渐增加，与 FSS 结构的输入阻抗匹配变好，使得$|S_{11}|$下降，而吸收率相应上升。因此，随着入射角的增加，传输系数（$|S_{21}|$）逐渐减小，如图 4（a）所示。表 3 给出了该 FSS 结构在入射角为 60°和 80°时的输入阻抗。很明显，在 80°入射角下，FSS 的输入阻抗在 10.5 GHz 和 11.7 GHz 时与 TE 波阻抗接近，$|S_{11}|$减小。此时，入射波可以进入 FSS 结构内部并在 PDMS 层中损耗（图 7（a）、（b）），导致在 10.5 GHz 和 11.7 GHz 出现 95%的显

著吸收峰（图 6（a））。这种吸收性能极大的拓宽了 FSS 的阻带范围，并提高了屏蔽性能。当入射角为 60°时，可得到同样结论。吸收率（A）的计算公式如下：

$$A(f) = (1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2) \times 100\%. \quad (3)$$

对于 TM 极化波，无论是垂直入射还是斜入射，所设计 FSS 结构的反射系数 $|S_{11}|$均在超宽频带（高达 18.1 GHz）内接近 0 dB，如图 6（b）所示。此时入射波在 FSS 表面反射，无法进入 PDMS 层（图 7）而实现良好的电磁屏蔽。同样，TM 极化方式下，所设计的 FSS 结构角度稳定性达到 80° 。



(a)

(b)

图6 不同入射波角度下FSS的反射系数和吸收率，(a)TE极化，(b) TM极化

Fig. 6. The reflection coefficients and absorptivity of the proposed FSS with respect to incident angles for TE (a) and TM (b) polarizations.

表 3 TE 极化参数值

Table 3. Parameters value for TE polarization

入射角 / °	频率/ GHz	S_{11} / dB	S_{21} / dB	Zin / Ω		Z_0 / Ω
				Re	Im	
80	10.5	-15.51	-18.23	2848.8	-565.8	2171.1
80	11.7	-20.79	-18.95	1844.8	-119.0	2171.1
60	12	-14.9	-17.01	765.1	-290.3	754

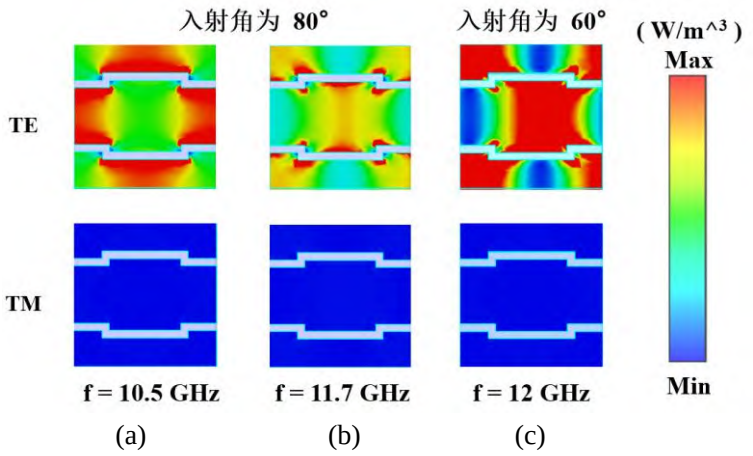


图 7 三种不同频率下的功率损耗密度：(a)和(b) 80 °斜入射，(c) 60 °斜入射

Fig. 7. The power loss density of the proposed FSS at the specific frequencies for TE and TM polarizations: oblique incidence of 80 °(a) and (b), and 60 °(c).

表 4 给出了所设计 FSS 结构与其他相关 FSS 结构的性能对比。从其他文献的性能对比也可以看出，所设计的 FSS 结构在实现透明性、可开关、超宽阻带以及角度稳定性方面均具有显著的性能优势。

表 4 与文献中相关工作的 FSS 结构性能对比

Table 4. Performance comparison of our design with what of reported FSSs

文献	透明度 / %	可开关或可调谐性能	10dB 屏蔽带宽 /GHz	角度稳定性 /°
[21]	N	N	3.0 – 12.0	60
[22]	N	N	7.34 - 15.0	45
[15]	81.6	N	0.71 - 1.25 1.73 - 2.16	60
[16]	84.5	N	8.0 – 12.0	NM
[27]	N	汞和油的体积调谐	4.08 - 16.96	NM
[28]	N	变容二极管调谐	0.54 - 2.5	60
[25]	N	EGaIn 注入不同层调谐	＜4.5 （底层结构） ＜12.2（顶层结构）	NM
[32]	N	EGaIn 注入控制全通到带阻	1.9 - 3.1（TM 极化） 3.2 - 4.2（TE 极化）	45 60
本文设计	81	EGaIn 注入控制全通到阻带	＜18.1	80

N：不支持该功能；NM：未提及

4. 实验验证

为了验证 FSS 结构的屏蔽性能及高角度稳定性，对该 FSS 结构进行加工，实

物尺寸为 200mm × 200mm，包含 20×20 个单元结构。制备过程如图 8 所示：首先，根据 FSS 结构制作 Ω 型脊金属模具（图 8(a)），将 PDMS 混合物（图 8(b)）倒入金属模具（图 8(c)）中，25℃条件下放置 24 小时凝固。随后，将 PDMS 层从金属模具中取出（图 8(d)），并将其放置在 PMMA 层上，从而制作出高度为 2mm、宽度为 0.5mm 的 Ω 型微流通道。用同样方法制作第二个 PDMS 层，并旋转 90°放置在 PMMA 底层。由此制作出带有正交排布 Ω 型微流通道的 FSS 结构。用弱酸预处理液态金属 EGaIn，去除表面氧化层，使用注射器将其注射到微流控通道中（图 8(e)）。图 8(f)展现了该 FSS 结构良好的透明性。

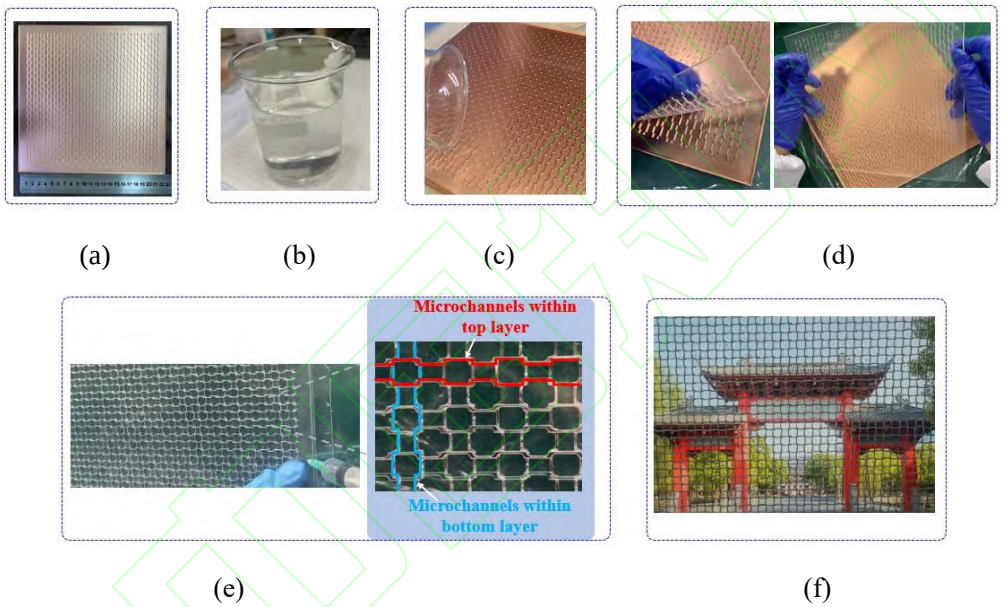
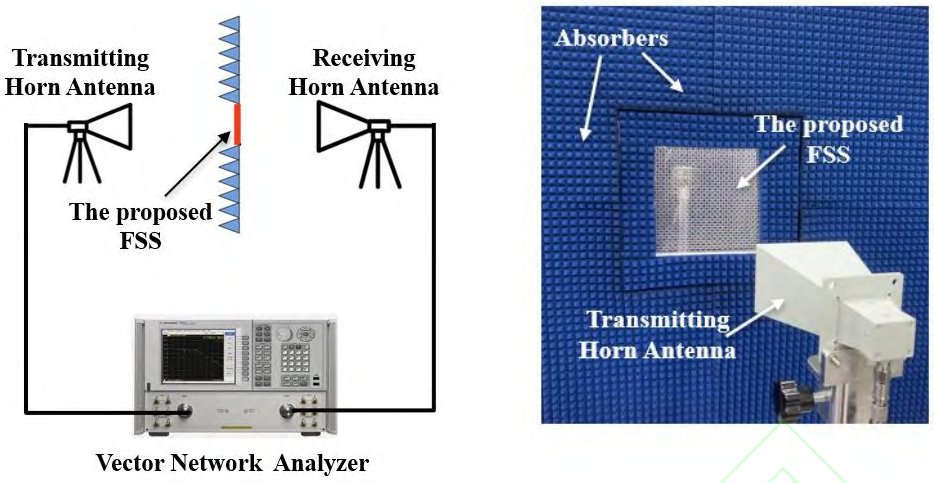


图 8. 制造过程概览： (a) 金属模具，(b) PDMS 混合物，(c)将溶液倒入模具，(d) 脱模，(e) 向微通道注入液态金属（EGaIn），(f) 透过 FSS 结构看到的美丽风景

Fig. 8. Overview of the fabrication process. (a) Metal mold. (b) The PDMS mixture. (c) Pull the solution into the mold. (d) Demold. (e) Inject liquid metal (EGaIn) into the microchannel. (f) Beautiful scenery seen through the proposed FSS.

测试系统如图 9 所示，主要完成对该 FSS 结构传输系数$|S_{21}|$的测试。测试使用了分别工作在 2 - 8 GHz 和 8 - 26 GHz 的两组喇叭天线，每组发射和接收天线置于待测 FSS 结构的两侧，相对摆放，并连接到 Agilent E8363C 矢量网络分析仪进行测量。制作的 FSS 结构安放在测试屏中心位置，如图 9(b)所示。测试中，首先将金属板放置在测试屏中央进行测试，然后再将所设计结构替换金属板进行测

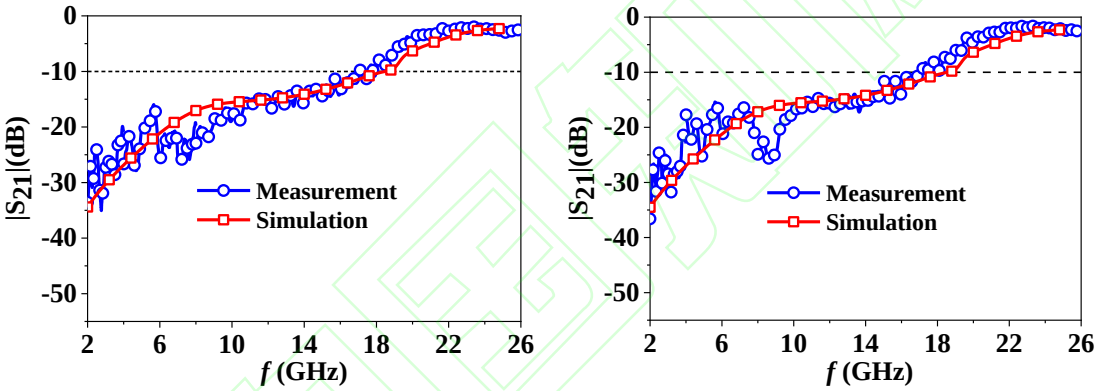
量，二者相减以避免周围环境对测量结果的影响[36]。



(a) (b)

图 9 实验测试系统 (a)示意图 (b) 实验测试装置图

Fig. 9. Measurement setup. (a) Sketch. (b) Photograph through the proposed FSS.



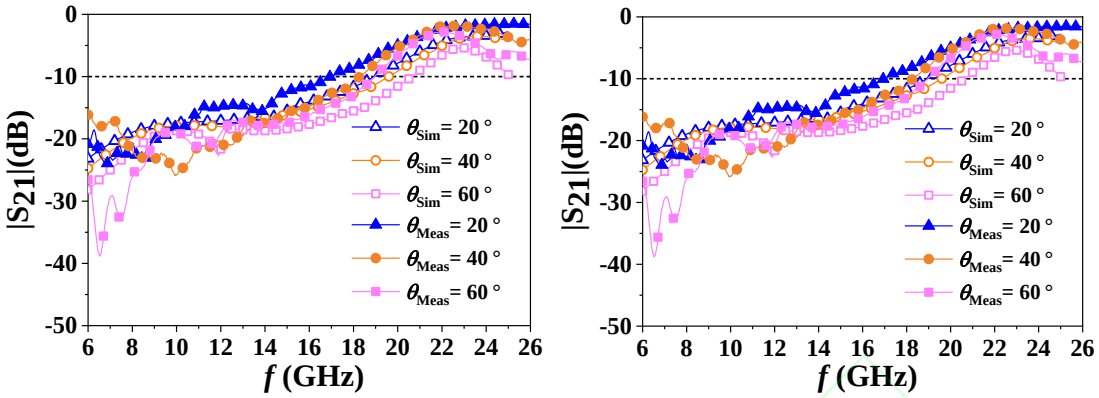
(a) (b)

图 10 垂直入射时，(a) TE 和 (b) TM 极化下$|S_{21}|$值测量结果与仿真结果的对比

Fig. 10. Comparison between simulated and measured $|S_{21}|$ of the proposed FSS at normal incidence for (a) TE and (b) TM polarizations.

图 10 为在 TE 和 TM 两种极化下传输系数$|S_{21}|$测试结果。可以看出，该结构满足$|S_{21}|$≤-10 dB 的带宽达到 17.8 GHz，与仿真结果吻合良好。图 11 展示了两种极化方式下电磁波入射角度对传输系数$|S_{21}|$的影响。可以看出，该结构具有良好的角度稳定性。当入射角度增加到 60°时，$|S_{21}|$≤-10 dB 的带宽仍能保持 17.0 GHz。由于安放 FSS 样品的测试屏尺寸有限，当入射角为 80°时，一方面入射波会被 FSS 结构旁吸波屏上的吸波材料阻挡，另一方面部分电磁波直接从发射天线绕射到接收天线，从而无法准确测量该入射角下的$|S_{21}|$，因此实验中最大入射角只到 60°。

测量结果与仿真结果之间的偏差主要是由于 FSS 样品中材料的电磁特性参数误差、尺寸误差、测试屏的边缘衍射效应和实验系统搭建中的误差造成的。



(a) (b)

图 11. 不同入射角度下，(a) TE 和(b) TM 极化下$|S_{21}|$值测量结果与仿真结果对比

Fig. 11. Comparison between simulated and measured $|S_{21}|$ of the proposed FSS at different incident angles for (a) TE and (b) TM polarizations.

5. 结 论

本文利用液态金属的流动性和导电性，提出了一种新颖的光学透明可开关超宽带电磁屏蔽体设计思路。采用液态金属 EGaIn 和透明材料（PMMA、PDMS）设计了一种具有超宽带、光学透明和可开关特性的频率选择表面电磁屏蔽结构。将液态金属流动的单层网格状微通道结构改善为两层 Ω 型正交微通道结构，不仅有利于液态金属的流动，减半液态金属用量，同时实现了 18.1 GHz（覆盖 P、L、S、C、X 和 Ku 波段）以下超宽带电磁干扰抑制。由于所设计 FSS 结构的旋转对称特点和 PDMS 材料的损耗，该 FSS 电磁屏蔽结构展现出极化稳定性和高达 80° 的入射角度稳定性。此外，利用液态金属的流动性实现可开关功能，避免了传统可调 FSS 结构中非透明有源元件的使用，使未覆盖金属区域达到 81%，确保了较好的光学透明性。这是首次实现透明、可调和宽阻带的 FSS 结构，与文献中相关研究相比，所提出的 FSS 设计在保持显著超宽阻带和卓越角度稳定性的同时，提供了光学透明和可开关功能，为多功能电磁屏蔽设计提供了新思路。

参考文献

[1] B. A. Munk, 2000 *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design* (New York, NY, USA: Wiley) p63

[2] Wang D J, Sun Z H, Zhang Y, Tang L, Yan L P 2024 *Acta Phys. Sin*. **73** 024201 (in Chinese)［王东俊, 孙子涵, 张袁, 唐莉, 闫丽萍 2024 物理学报 **73** 024201］

[3] Zhao Y T, Li Y S, Yang G H 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 198101 (in Chinese)［赵宇婷, 李迎松, 杨国辉 2020 物理学报 **69** 198101］

[4] Liao W J, Zhang W Y, Hou Y C, Chen S T, Kuo C Y, Chou M 2019 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett*. **18** 2076

[5] Feng K S, Li N, Li T 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 034101 (in Chinese) [冯奎胜, 李娜, 李桐 2022 物理学报 **71** 034101]

[6] Chiu C N, Chang Y C, Hsieh H C, Chen C H 2010 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **52** 56

[7] Li D, Li T W, Li E P, Zhang Y J 2018 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **60** 768

[8] Nauman M, Saleem R, Rashid A K, Shafique M F 2016 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **58** 419

[9] Yin W Y, Zhang H, Zhong T, Min X L 2018 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **60** 2057

[10] Chaluvadi M, Kanth V K, Thomas KG 2020 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **62** 1068

[11] Yong W Y , Rahim S K A , Himdi M, Seman F C， Suong D L， Ramli M R， Elmobarak H A 2018 *IEEE Access.* **6** 11657

[12] Chaudhary V, Panwar R 2021 *IEEE Trans. Magn.* **57** 2800710

[13] Abirami B S, Sundarsingh E F, Ramalingam V S 2020 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **62** 2643

[14] Sanjeev Y , Prakash J C , Mohan S M 2019 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **61** 887

[15] Yang Y, Li W, Salama K N, Shamim A 2021 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **69** 2779

[16] Lei Q Y, Luo Z L, Zheng X Y, Lu N, Zhang Y M, Huang J F, Yang L, Gao S M, Liang Y Y, He S L 2023 *Opt. Mater. Express*. **13** 469

[17] Guo Q X, Peng Q Y, Qu M J, Su J X, Li Z R 2022 *Opt. Express* **30** 7793

[18] Zhang Y Q, Dong H X, Mou N L, Chen L L, Li R H, Zhang L 2020 *Opt. Express*. **28** 26836

[19] Jiang H, Yang W, Lei S, Hu H, Chen B, Bao Y, He Z 2021 *Opt. Express*. **29** 29439

[20] Dewani A A, O'Keefe S G, Thiel D V, Galehdar A 2018 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **66** 790

[21] Habib S, Kiani G I, Butt M F U 2019 *IEEE Access*. **7** 65075

[22] Xu, S J, Li Y, Ahmed M, Fang L D, Jin N, Li B H, Huo S Y, Lei X Y, Sun Z, Yu H Y, Li E P 2021 *IEEE Access*. **9** 161854

[23] Syed I S, Ranga Y, Matekovits L, Esselle K P, Hay S 2014 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **56** 1404

[24] Katoch K, Jaglan N, Gupta S D 2021 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **63** 1423

[25] Li P, Liu W, Ren Z, Meng W, Song L2022 *IEEE Access*. **10** 9446

[26] Zhou S H, Fang X Y, Li M M, Yu Y F, Chen R S 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 204101 (in Chinese) [周仕浩, 房欣宇, 李猛猛, 俞叶峰, 陈如山 2020 物理学报 **69** 204101]

[27] Lei B J, Zamora A, Chun T F, Ohta A T, Shiroma W A. 2011 *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.* **21** 465

[28] Ghosh S, Srivastava K V 2018 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **60** 166

[29] Saikia M, Srivastava K V, Ramakrishna S A 2020 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **68** 2937

[30] Sivasamy R, Moorthy B, Kanagasabai M, Samsingh V R, Alsath M G N 2018 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **60** 280

[31] Han P, Wang J, Wang J F, Ma H , Shao T Q, Chen H Y, Zhang J Q, Qu S B 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 197701 (in Chinese) [韩鹏, 王军, 王甲富, 马华, 邵腾强, 陈红雅, 张介秋, 屈绍波. 2016 物理学报 **65** 197701]

[32] Ghosh S, Lim S 2018 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **66**, 4953

[33] Wang C R, Yan L P, Sun Z H, Yang Y, Zhao X 2022 *Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)*, Beijing, China, September 1-4, 2022 p669

[34] Sheikh S 2016 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **15** 1661

[35] Ghosh S, Lim S 2018 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **66** 3857

[36] Yan L P, Xu L L, Gao R X K, Zhang J H, Yang X P, Zhao X 2022 *IEEE Trans. Electromagn*. Compat. **64** 251

Switchable and Optically Transparent Ultrawide Stopband Frequency Selective Surface for Electromagnetic Shielding*

Wang Cheng-Rong[1)2)] Tang Li[1)] Zhou Yan-Ping[1)†] Zhao Xiang[1)] Liu Chang-Jun[1)]

Yan Li-Ping[1)†]

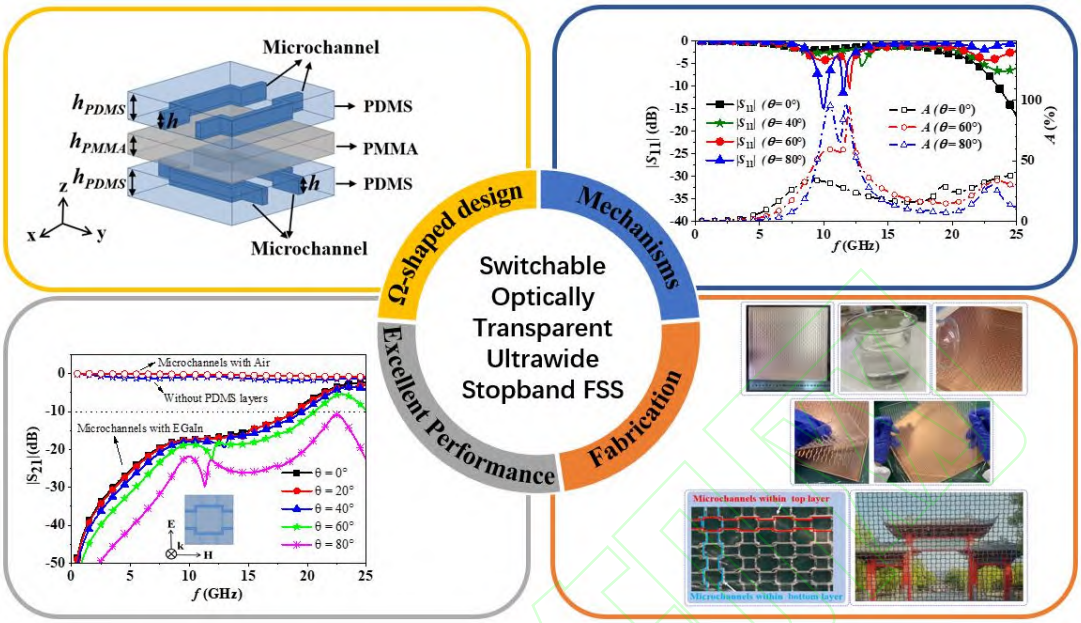
1) (College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

2) (Department of Electronic Information Engineering, Chengdu Jincheng College, Chengdu 611731, China)

Abstract

Given that high frequency electromagnetic waves primarily enter buildings through windows and glass doors, there is an increasing need for switchable optically-transparent shielding with broad stopband. Herein, A novel design for a switchable and optically transparent frequency selective surface (FSS) with ultrawide-stopband is presented in this study. The structure consists of a polymethyl methacrylate (PMMA) layer sandwiched between polydimethylsiloxane (PDMS) layers which contain liquid metal microchannels arranged in an orthogonal Ω-shaped configuration. The mobility of the liquid metal allows for switching the FSS response from an all-pass to an ultrawide bandstop behavior. The proposed FSS achieves a rejection bandwidth of 18.1 GHz that covers P, L, S, C, X and Ku bands, while maintaining a transparency of 81% and high angular stability up to 80°, regardless of polarization. Furthermore, the mechanism underlying the ultrawide stopband and high angular stability is explored through an

analysis of reflection and absorption for both TE and TM polarizations. Experimental validation under both normal and oblique incidence demonstrates the ultrawide-stopband performance of the fabricated FSS.



Keywords: electromagnetic shielding, frequency selective surface (FSS), liquid metal, optically transparent, switchable

---

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U22A2015), Sichuan Science and Technology Program under Grant 24GJHZ0386, and Sichuan University Yibin School-City Cooperation Program (2020CDYB-31).

† Co-Corresponding author. E-mail:
liping_yan@scu.edu.cn
ypzhou11@scu.edu.cn
first authors. E-mail: chengrong_wang@126.com